

FeCrAl 系合金の α' 相析出に及ぼす照射条件パラメータの影響評価

Effect Evaluation of Irradiation Condition Parameters on α' phase precipitation in FeCrAl-based system

山下 真一郎¹⁾ 阿部 陽介¹⁾ 大久保 成彰¹⁾ 鵜飼 重治¹⁾ 佐々木 泰祐²⁾

Shinichiro YAMASHITA Yosuke ABE Nariaki OKUBO Shigeharu UKAI Taisuke SASAKI

¹⁾原子力機構

²⁾物質・材料研究機構

(概要)

事故耐性燃料被覆管として期待される FeCrAl 合金において、脆化相 (α' 相) の析出挙動を把握し、予測モデルの構築に資することを目的として、イオン照射実験を継続した。既往の離散組成試料を用いた 3DAP/TEM 評価に加え、コンビナトリアル試料のハイスループット硬さマッピング結果を取り込み、照射硬化を介した α' 相析出の組成依存性をより高い分解能で整理した。10.5 MeV Fe³⁺イオン、350±10℃、2.5×10⁻⁴ dpa/s、ピーク損傷量 9.1 dpa の条件下で、Fe-Cr-Al 三元系の広い組成域における照射硬化分布を取得した結果、Cr-rich α' 相析出に起因する硬化は 15~35 at.%Cr 域で Al 濃度 3.9±0.8 at.%付近で最大となり、それ以上の Al 添加で顕著に抑制されることが分かった。

キーワード：事故耐性燃料被覆管、FeCrAl 系合金、イオン照射、 α' 相、微細組織

1. 目的

2011 年に発生した東京電力福島第一原子力発電所 (1F) 事故を受けて、既存の燃料部材に比べて事故耐性の高い新型燃料部材、いわゆる事故耐性燃料 (ATF : Accident Tolerant Fuel) の需要が世界的に高まっている。耐熱鋼として広く知られている FeCrAl 系合金は、1F 事故で経験した過酷事故 (SA: Severe Accident) 時に、その初期段階で生じた被覆管酸化反応を低減 (従来材であるジルコニウム基合金に比べて酸化速度を 2 桁以上低減) し、水素と熱の発生を抑制することで過酷事故への進展を遅らせる、もしくは過酷事故そのものを生じさせない既存軽水炉の安全性を向上させる概念として早期実用化が期待されている。FeCrAl 系合金に関しては米国での先行研究の報告 [1] があり、Fe-xCr-yAl-zY モデル合金 (X=5~25, y=4~8, z=0~3 (wt%)) に対して、様々な材料特性が調査されている。FeCrAl 系合金を軽水炉の炉心材料として適用するに当たっては、中性子照射下での材料脆化、とりわけ 288~360℃の低温で長期間の照射を受けたことによりその発現が懸念される、脆化相 (クロムリッチの α' 相) の析出挙動 (化学組成、照射温度、損傷速度、損傷量、初期組織等との関係) が重要であることが指摘されている。

以上のことから、本研究では FeCrAl 系合金の脆化相 (α' 相) の析出挙動に着目し、化学組成、照射温度、損傷速度、損傷量、初期組織の違いをパラメータにイオン照射実験を行い、照射前後の詳細なキャラクタリゼーションから体系的に FeCrAl 系合金の α' 相の析出マップを整備することを目的とする。この析出マップの整備により、より損傷速度が低い実機中性子照射環境下での、FeCrAl 系合金の α' 相の析出挙動、及び材料脆化の予測シミュレーション等に発展させていくことを目指す。

2. 実施方法

Fe-xCr-yAl モデル合金 (x=10~21, y=0~8 (wt%)) の複数種類の短冊状試料を準備し、イオン照射試験に供した。イオン照射は、表 1 に示した試験マトリックスに従い、10.5 MeV の Fe イオンを照射温度 350℃の条件を中心に、1×10⁻⁶ ~ 1×10⁻⁴dpa/s の範囲の 3 段階の異なる損傷速度で 0.24、0.64、1.44 dpa の照射量まで実施した。

さらに継続研究として、拡散接合により作製した Fe-Cr-Al コンビナトリアル試料に対し、10.5 MeV Fe³⁺

表 1 イオン照射試験マトリックス

実験マトリクス			照射温度								
			300℃			350℃			450℃		
			損傷速度 (dpa/s)			損傷速度 (dpa/s)			損傷速度 (dpa/s)		
			1e-5	1e-4	1e-3	1e-5	1e-4	1e-3	1e-5	1e-4	1e-3
14種類の短冊試料	照射量 (dpa)	0.24				○	○	○			
		0.64				○	○	○			
		1.44		○		○	○	○		○	
コンビナトリアル試料		0.64					○		○		
		1.44					○		○		

(*) 損傷速度と照射量の値は、評価手法 (3 次元アトムプローブ評価、連続剛性測定ナノインデンテーション) 毎に異なり、表 1 では前年度の記載を踏襲し、3 次元アトムプローブ評価の値を記載。

イオンを用いて $350 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 2.5×10^{-4} dpa/s、ピーク損傷量 9.1 dpa まで照射し、連続剛性測定ナノインデンテーション (CSM-NI) によるハイスループット硬さ分布評価を実施した。試料内の局所組成は SEM-EDS 測定値を LOESS 補間して各圧痕位置へ割り当て、Cr 濃度 0~45 at. %、Al 濃度 0~25 at. % の範囲で 0.5 at. % 以下の組成分解能を確保した。照射材・非照射材の深さ方向硬さデータは Nix-Gao 解析により整理し、照射層硬さ $H_0(\text{irrad})$ と母材硬さ $H_0(\text{unirrad})$ の差から照射硬化量 ΔH_0 を算出した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

図 1 に、Fe-Cr-Al コンビナトリアル試料に対する高スループット照射硬化マッピングを実施した結果を示す。非照射材の硬さ値が約 1.5~3.5 GPa を示す一方で、照射材では概ね 4.5~7 GPa の範囲となり、照射硬化量 ΔH_0 は高 Cr・低 Al 側で最大となった。特に 30~40 at. %Cr かつ 5 at. %未満の低 Al 域で大きな硬化 (4.5GPa) が観測され、Cr-rich の α' 相析出に伴う追加硬化の寄与が示された。

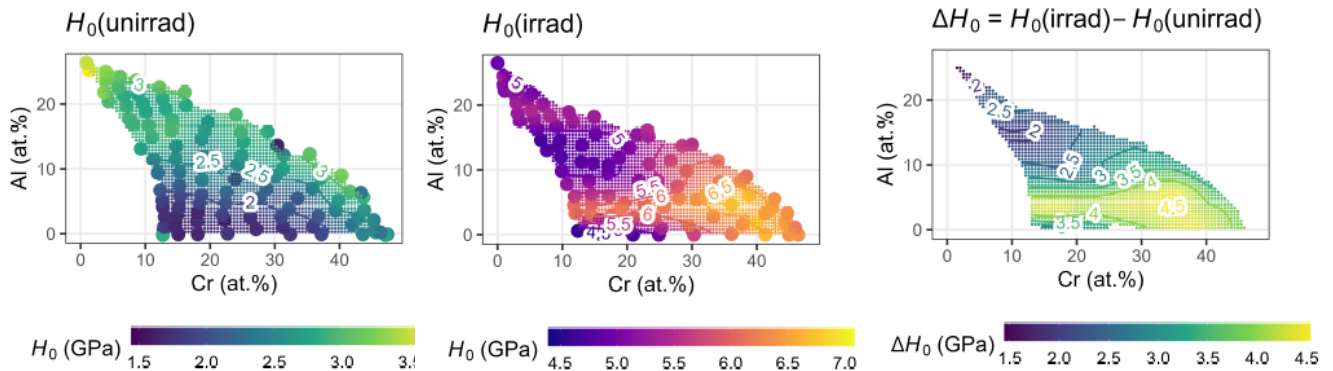


図1 Fe-Cr-Al コンビナトリアル試料に対する高スループット照射硬化マッピングの結果
非照射材の硬さ値 (左)、照射材の硬さ値 (中)、照射材の硬さ値から非照射材の硬さ値を引いた差分 (右)
図中の縦横軸は、いずれも縦軸を Al 濃度 (at%)、横軸を Cr 濃度 (at%) として表記。

照射硬化マップを Cr 濃度および Al 濃度の関数として整理した結果、15~35 at. %Cr の範囲で Al 濃度 3.9 ± 0.8 at. %付近に硬化の極大が認められた。その後は、Al 濃度の上昇に伴って硬化量が単調に低下し、約 15 at. %Al 以上ではおよそ 2 GPa のプラトーに達した。この高 Al 域は主として照射欠陥クラスター由来のベースライン硬化に相当し、 α' 相析出が実質的に抑制された状態と解釈される。

また、 α' 相が熱力学的に抑制される組成域 ($\text{Cr} \leq 10$ at. %, $\text{Al} \geq 15$ at. %) から見積もった欠陥硬化ベースラインは 2.2 ± 0.3 GPa であり、 α' 相析出域ではこれに加えて約 2 GPa 程度の追加硬化が認められる。両寄与の差し引き (α' 寄与 - 欠陥寄与) は最大で約 +0.5 GPa (α' 優位 @ Al ≈ 4 at. %)、最小で約 -2.0 GPa (欠陥優位 @ Al > 15 at. %) の範囲で組成依存性を示した。3DAP 観察でも、高 Cr で析出が促進され、高 Al で抑制される傾向が一貫して確認されており、本報告書で扱う 0.24~1.44 dpa 域の知見と整合している。

以上より、従来整理してきた「低損傷速度・高 Cr・高損傷量で α' 相生成量が増加する」という傾向に加え、Al 添加効果には単純な単調抑制ではなく、低 Al 側で一旦硬化を助長した後、約 4 at. %付近を境に抑制へ転じる速度論的しきい値が存在することが明らかとなった。

これらの結果を含む研究成果は、学術誌に投稿し、2026 年 4 月に掲載された[2]。

4. 引用(参照)文献等

- [1] ORNL/TM-2017/186 Rev. 1 “Handbook on the Material Properties of FeCrAl Alloys for Nuclear Power Production Applications”, August 2017.
- [2] Y. Abe, A. Kubo, D. Geng, S. Yamashita, N. Okubo, T. Tsuru, T.T. Sasaki, H. Yu, R. Kasada, S. Ukai, “Kinetic threshold for α' suppression in ion-irradiated Fe-Cr-Al alloys revealed by high-throughput mapping,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 576 (2026) 166135. DOI: 10.1016/j.nimb.2026.166135.